Aus der Augenklinik der Universität Tübingen
Direktor: Professor Dr. med. Heinrich Harms
Forschungsabteilung I für Pathophysiologie des Sehens
Leiterin: Professor Dr. Elfriede Aulhorn

Über die binoculare Helligkeitsempfindung und ihre Beziehung zur monocularen Dominanz

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin
einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Stephan Eisert
aus Waiblingen

1969

Aus der Augenklinik der Universität Tübingen
Direktor: Professor Dr. med. Heinrich Harms
Forschungsabteilung I für Pathophysiologie des Sehens
Leiterin: Professor Dr. Elfriede Aulhorn

Über die binoculare Helligkeitsempfindung und ihre Beziehung zur monocularen Dominanz

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin
einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Stephan Eisert
aus Waiblingen

1969

Dekan: Professor Dr. J. Hirschmann

1. Berichterstatter: Professor Dr. E. Aulhorn
2. Berichterstatter: Professor Dr. E. Betz

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Gesamtherstellung (Schreibsatz mit IBM Composer):
FOTODRUCK PRÄZIS Barbara v.Spangenberg KG · Tübingen

INHALT

Seite

EINLEITUNG 1

METHODIK 5

1. Apparatur 5
2. Versuchspersonen 8
3. Versuchsanordnung 8
4. Versuchsgang 8
5. Zusätzliche Untersuchungen in anderen Leuchtdichtebereichen ... 9

DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE 10

1. Darstellungsart 10
2. Ergebnisse 11
3. Wiederholbarkeit der Ergebnisse 17
4. Ergebnisse in anderen Leuchtdichtebereichen 17

BESPRECHUNG DER ERGEBNISSE 21

ZUSAMMENFASSUNG 30

LITERATUR 31

EINLEITUNG

Es ist bis heute weitgehend ungeklärt, wie die Einzelbilder beider Augen zu einem einheitlich empfundenen Gesamtbild integriert werden. Einen gewissen Einblick in den Mechanismus dieses physiologischen Vorgangs erhält man, wenn beiden Augen unterschiedliche Bilder dargeboten werden. Weichen diese Bilder in Farbe oder Kontur voneinander ab, so kommt es zum „*Wettstreit*" beider Bilder, der ausführlichen Untersuchungen unterzogen wurde (PANUM [1858], FECHNER [1861], HERING [1864], AUBERT [1865], HELMHOLTZ [1867], ROELOFS und ZEEMANN [1919], GELLHORN und Mitarbeiter [1924, 1925], TSCHERMAK-SEYSENEGG [1931, 1942], HAMBURGER [1949], KAUFMAN [1963], LEVELT [1965 b] u. a.), sind sie aber nur hinsichtlich ihrer Helligkeit verschieden, so können sie fusioniert werden, wenn nicht entgegengesetzte Kontraste vorliegen. Es entsteht dann also ein einheitlich empfundenes Gesamtbild.

Diese aus unterschiedlichen monocularen Helligkeiten resultierende binoculare Helligkeitsempfindung ist oft untersucht worden, im letzten Jahrhundert vor allem von PANUM [1858], FECHNER [1861], HERING [1864] und AUBERT [1865], in diesem Jahrhundert von SHERRINGTON [1908], DE SILVA und BARTLEY [1930], FRY und BARTLEY [1933], LEVELT [1965] und ENGEL [1967].

AUBERT unternahm die umfangreichsten Messungen. In seinen Untersuchungen blieb die dem rechten Auge gebotene Helligkeit konstant, die dem linken Auge gebotene Helligkeit wurde verändert. Die Versuchsperson mußte ein monocular gesehenes Vergleichsfeld auf gleiche Helligkeit mit den fusionierten monocularen Helligkeiten – dem Testfeld – bringen. In SHERRINGTON's Versuchen war das Vergleichsfeld binocular zu sehen. Es wurden aber nur fünf Paare verschiedener monocularer Helligkeiten untersucht, wobei wieder die Helligkeit für ein Auge konstant gehalten und für das andere Auge verändert wurde. Die Ergebnisse dieser beiden Autoren differieren nur unwesentlich, die dem Vergleichsfeld gegebene Helligkeit entsprach etwa dem arithmetischen Mittel der monocularen Helligkeiten. DE SILVA und BARTLEY sowie FRY und BARTLEY boten Test- und Vergleichsfeld nicht successiv wie AUBERT und SHERRINGTON sondern simultan dar und fanden als Hauptergebnis, daß ein nur monocular gesehenes Bild 1,27 – 1,44 mal heller sein muß als ein binocular wahrgenommenes, um den gleichen Helligkeitseindruck wie dieses hervorzurufen. Sie benützten hierfür den Begriff „*binoculare Helligkeitssummation*". Alle andere Untersucher stellten allerdings bei successiver Darbietung von Test- und Vergleichsfeld ein erheblich geringere binoculare Summation fest. Nach TOMLINSON [1926] zum Beispiel ist der monoculare Helligkeitseindruck nur um 1/7 schwächer als der binoculare.

Von den bisher genannten Autoren unterscheiden sich LEVELT [1965] und ENGEL [1967] in ihrer Methodik grundsätzlich. In LEVELT's Experimenten blieb die Leuchtdichte des binocularen Vergleichsfeldes konstant; eine monocular angebotene Leuchtdichte wurde vom Versuchsleiter stufenweise verändert, die andere monoculare Leuchtdichte war von der Versuchsperson so einzustellen, daß Testfeld und Vergleichsfeld die gleiche Helligkeit aufwiesen; dabei wurden Test- und Vergleichsfeld successiv angeboten. Auf diese Weise gewann LEVELT im Bereich einer log. Einheit eine Reihe verschiedener Paare monocularer Leuchtdichten, die die gleiche konstante binoculare Helligkeitsempfindung auslösten. In graphischer Darstellung mit den monocularen Leuchtdichten als Koordinaten ergab sich so eine Kurve gleicher Helligkeit. Bei nicht zu großer Differenz der monocularen Leuchtdichten ist diese Kurve eine Gerade, für die LEVELT folgende Gleichung vorschlug:

$$L_b = w_r L_r + w_l L_l$$

Dabei ist L_b die Leuchtdichte des binocular gesehenen Vergleichsfeldes, L_r und L_l stehen für die beiden monocularen Leuchtdichten, die miteinander den gleichen Helligkeitseindruck hervorrufen wie zwei monoculare Leuchtdichten der Größe L_b; w_r und w_l stellen Gewichtskoeffizienten dar. Nach der von LEVELT zum Gesetz erhobenen These HERING's vom komplementären Anteil beider Einzelaugen am gemeinsamen Sehfeld ist ihre Summe 1. Bei nicht zu großen Unterschieden der monocularen Leuchtdichten sind ihre Werte für die einzelne Versuchsperson konstant. Wird eine monoculare Leuchtdichte sehr klein, so ändert sich nach LEVELT der Wert der Gewichtskoeffizienten; die größere monoculare Leuchtdichte trägt dann relativ mehr zum binocularen Helligkeitseindruck bei, und die Kurve gleicher Helligkeit verläuft nicht mehr linear. Es gelang LEVELT, die Gewichtskoeffizienten durch Variieren der Konturinformation der monocularen Testfelder zu beeinflussen. Eine zusätzliche, monocular dargebotene Kontur bewirkte eine Vergrößerung des Gewichtskoeffizienten für das betreffende Auge auf Kosten des Koeffizienten des anderen Auges. Der Einfluß der Kontur war am größten in ihrer unmittelbaren Umgebung, er war maximal innerhalb 1^0 vom Fixationspunkt.

Im allgemeinen bestimmt nach LEVELT die Konturinformation den Wert der Gewichtskoeffizienten. Ist die Konturinformation für beide Augen gleich, so gibt die Dominanz eines Auges für den Wert der Gewichtskoeffizienten den Ausschlag. LEVELT schloß dies daraus, daß die Kurve gleicher Helligkeit in ihrem linearen Bereich bei seinen drei Versuchspersonen unterschiedliche Steigung aufwies. Bei völliger Gleichwertigkeit beider Augen und gleicher Konturinformation haben die Gewichtskoeffizienten den Wert 1/2. Die binocular empfundene Helligkeit entspricht dann dem arithmetischen Mittel der monocularen Leuchtdichten.

ENGEL's Arbeit ist ein Versuch, den inneren Mechanismus des visuellen Systems zu ergründen, dem die Integration unterschiedlicher monocularer Helligkeiten zu einer einheitlichen Gesamtempfindung unterliegt. In seinen Untersuchungen wurde beiden Augen ein kreuzförmiges Muster geboten, das fünf Felder verschiedener Leuchtdichte enthielt. Durch entsprechende Anordnung dieser Felder war es möglich, beiden Augen

auf korrespondierenden Netzhautstellen gleichzeitig fünf verschiedene Paare unterschiedlicher monocularer Leuchtdichten zu bieten. Auf diese Weise konnte die binoculare Helligkeitsempfindung sowohl als Funktion der einzelnen Testfeldpaare als auch als Funktion einer Kreuzkorrelation der monocularen Muster untersucht werden. Die Darbietung konstanter monocularer Muster gewährleistete nach ENGEL, daß Adaptationszustand wie Konturinformation während des Experiments für beide Augen unverändert blieben. Zur Berücksichtigung von Simultankontrasteffekten ließ ENGEL die Versuchspersonen die Helligkeit der Einzelfelder bei monocular dargebotenem Muster schätzen. Die sich aus der Fusion der beiden monocularen Felder ergebende binoculare Helligkeitsempfindung wurde als arithmetisches Mittel, geometrisches Mittel und Vektorsumme der Helligkeitsschätzwerte der Einzelfelder berechnet. Diese hypothetischen Werte wurden mit der Helligkeit eines binocular gesehenen Vergleichsfeldes verglichen, das die Versuchsperson auf die Helligkeit zweier fusionierter Einzelfelder eingestellt hatte. Der Versuch wurde mit drei Versuchspersonen über einen Leuchtdichtebereich von 3 log. Einheiten durchgeführt. Die binoculare Helligkeitsempfindung stellte sich annähernd als Funktion der vektoriellen Summe der monocularen Helligkeitsempfindungen und örtlicher Kreuzkorrelation der beiden monocularen Muster heraus, entsprach aber ebenso gut dem arithmetischen Mittel der Leuchtdichten der beiden monocularen Einzelfelder.

LEVELT nimmt nach seinen Ergebnissen einen Einfluß der Dominanz auf die binoculare Helligkeitsempfindung an. Die Begriffe *Dominanz* eines Auges, *Äugigkeit*, *funktionelle Asymmetrie* beider Augen oder *sensorische Prävalenz* beschreiben ein Phänomen, das bisher nur mit psychophysischen Untersuchungsmethoden erfaßbar ist, nämlich die Erscheinung, daß die beiden Augen im binocularen Sehakt funktionell nicht gleichwertig sind, obwohl sie sich morphologisch und bei monocularer Prüfung auch funktionell nicht unterscheiden. Dieses Phänomen wird von den es beschreibenden Autoren je nach den Untersuchungsmethoden, mit denen es festgestellt wurde, verschieden definiert. ROSENBACH [1903] sieht entsprechend seiner Visiermethode in ihm die monoculare Vorherrschaft bei der binocularen *Richtungslokalisation*, HAMBURGER [1943], REMKY [1950], REMKY und KÜCHLE [1951] sehen die Dominanz in der *zeitlichen Prävalenz* eines Auges beim binocularen Wettstreit, in SACHSENWEGER's Studie über den stereoskopischen Glanz wird die Dominanz als vorwiegend *sensorische Prävalenz* eines Auges beim binocularen Sehakt aufgefaßt [1960].

In dieser Arbeit soll nun die aus unterschiedlichen monocularen Leuchtdichten entstehende binoculare Helligkeitsempfindung und ihre mögliche Beeinflussung durch die monoculare Dominanz an einer größeren Gruppe von Versuchspersonen systematisch untersucht werden. Ein solches Unterfangen erfordert eine Methodik, die es ermöglicht:

1. die Eindrücke beider Augen vollständig zu trennen und dabei
2. beiden Augen ein vollkommen gleiches Bild zu bieten,
3. die Helligkeitsempfindung sehr genau zu bestimmen, da der Dominanzeinfluß sehr gering sein kann, und

4. den Versuch für beide Augen genau gleich durchzuführen, da nur so gewonnene Ergebnisse Aufschluß über eine Auswirkung der Dominanz geben können.

METHODIK

1. Apparatur

Das Verfahren der PHASENDIFFERENZHAPLOSKOPIE von AULHORN [1966] ermöglicht es, die Eindrücke beider Augen vollständig zu trennen und dabei beiden Augen ein völlig gleiches Bild zu bieten; ein binocular gesehenes Vergleichsfeld kann gleichzeitig mit einem durch Verschmelzung zweier monocularer Bilder verschiedener Leuchtdichte entstehenden Testfeld wahrgenommen werden, was einen sehr empfindlichen Helligkeitsvergleich zwischen Test- und Vergleichsfeld gewährleistet.

Diese Methode zur Trennung der Eindrücke beider Augen nützt die Trägheit des Sehorgans. Wird der Strahlengang eines Diapositiv-Projektors rhythmisch mit sehr hoher Frequenz unterbrochen, so kann das Auge die Einzeldarbietungen des projizierten Bildes nicht mehr auflösen, wenn die Unterbrecherfrequenz deutlich über 35 Hz, der Verschmelzungsfrequenz des Auges liegt. Das Auge nimmt ein Bild wahr, das sich von einem kontinuierlich dargebotenen nicht unterscheidet. Zur rhythmischen Unterbrechung des Strahlenganges wird eine Sektorenscheibe (Abb. 1) benützt, die durch einen Synchronometer mit einer Umdrehungsfrequenz von 25 Hz betrieben wird. Bei vier Sektoren, wie in unserer Apparatur, ergibt sich so eine Unterbrecherfrequenz von 100 Hz. Eine gleichartige Sektorenscheibe in der Blicklinie eines Auges läßt dieses ebenfalls ein kontinuierliches Bild wahrnehmen.

Laufen nun die Sektorenscheiben vor dem Bildprojektor und vor dem Auge mit gleicher Frequenz und gleicher Phase, so wird das projizierte Bild auf normale Weise gesehen, da zum gleichen Zeitpunkt das Bild projiziert wird, und der Blick des Auges freigegeben ist. Wird jedoch zwischen den beiden Unterbrechersystemen eine Phasenverschiebung der Art vorgenommen, daß das Bild immer dann dargeboten wird, wenn das Auge verdeckt ist, so ist das Bild für das Auge nicht sichtbar. Läßt man dann vor beiden Augen je eine Sektorenscheibe laufen, so wird je nach Phaseneinstellung das projizierte Bild entweder nur für das eine Auge oder für das andere Auge oder auch für beide Augen sichtbar sein. Wird nun noch ein Bildprojektor mit Unterbrechersystem benutzt, so kann durch entsprechende Phaseneinstellung jedem Auge sein eigenes Bild vermittelt werden, das von dem anderen Auge nicht wahrgenommen wird.

Alle Gegenstände im Raum oder Bilder, die nicht aus einem dieser beiden Projektoren stammen, werden von beiden Augen normal gesehen, allerdings mit einer Lichtabschwächung bewirkt durch die Unterbrechung des Strahlengangs durch die Sektorenscheiben vor beiden Augen. Da diese Sektorenscheiben in unserer Apparatur vier 30^0 - Sektoren aufweisen, beträgt diese Lichtabschwächung 66,6 %. Die von den beiden

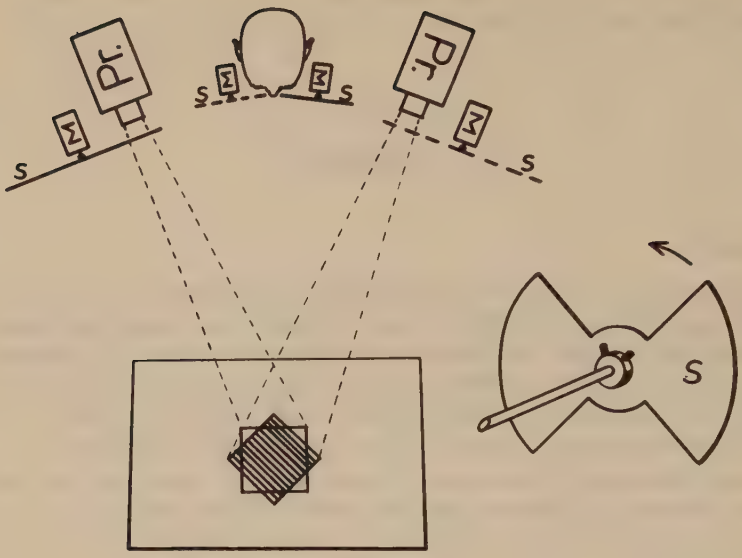


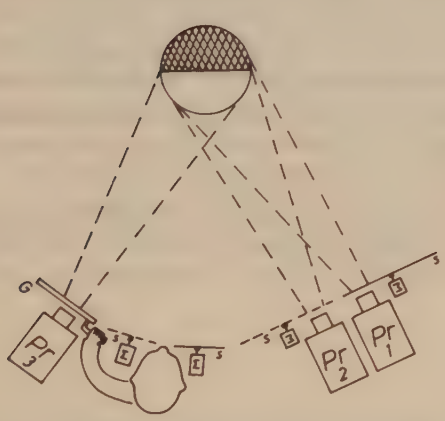
Abb. 1: Prinzip der PHASENDIFFERENZHAPLOSKOPIE.
Die Sektorenscheibe vor dem rechten Auge läuft phasengleich mit der des linken Projektors und umgekehrt. (Sektorenscheibe gebrochen gezeichnet: Strahlengang freigegeben; Sektorenscheibe durchgezogen gezeichnet: Strahlengang unterbrochen. M = Motor, Pr = Projektor, S = Sektorenscheibe zur Unterbrechung des Strahlengangs).

Projektoren mit Unterbrechersystem entworfenen Bilder erfahren durch die Sektorenscheiben vor den Augen keine weitere Lichtabschwächung, denn bei phasen-, frequenzgleichem Lauf der Sektorenscheiben vor Projektor und Auge wird das entworfene Bild stets im Augenblick seines Entstehens voll wahrgenommen.

Mittels der beiden Projektoren mit Unterbrechersystem wird auf die gleiche Stelle der Untersuchungswand ein halbkreisförmiges Feld, das nur vom rechten und ein gleiches, das nur vom linken Auge gesehen werden kann, entworfen, so daß bei binocularer Betrachtung nur ein einheitliches halbkreisförmiges Feld, das Testfeld, wahrgenommen wird (Abb. 2a). Der Helligkeitseindruck, den dieses Testfeld vermittelt, ist sowohl durch die Wahrnehmung des rechten wie die des linken Auges bestimmt. Unter dieses Testfeld wird ein zweites für beide Augen gleichermaßen sichtbares gleich großes halbkreisförmiges Feld von einem Projektor ohne Unterbrechersystem so projiziert, daß sich insgesamt ein kreisrundes Feld von 5^0 Radius ergibt (Abb. 2b). Die Leuchtdichte dieses Vergleichsfeldes kann von der Versuchsperson selbst kontinuierlich oder in Sprüngen mit Hilfe eines Graukeiles variiert werden, und zwar mit einer Einstellgenauigkeit von weniger als 1/100 log. Einheiten.

Die Apparatur sieht folgendermaßen aus: auf einem Stativ drehen sich in zwei runden sehr flachen Gehäusen die Sektorenscheiben. Die Gehäuse sind mit Durchblicköffnungen versehen, die sich wie Gläser einer Brille frontoparallel vor beide Augen bringen lassen, wenn der Kopf auf einer Kinnstütze ruht. Diese Kinnstütze ist in ihrer Höhe verstellbar und dient dazu, der Versuchsperson eine bequeme Kopfhaltung direkt vor dem Gehäuse zu ermöglichen, wobei die Stirn gegen das Gehäuse gelehnt werden kann. Außerdem gewährleistet sie, daß durch Verstellen ihrer Höhe und durch Änderung des Abstands zwischen den Gehäusen die Pupillenmitte genau in die Mitte der Durchblicköffnungen gebracht werden kann, was für eine exakte Helligkeitseinstellung nötig ist. Der Durchmesser der Durchblicköffnungen beträgt 3,5 cm, der Gesichtsfeldausschnitt etwa 50^0.

Rechts von der hinter dieser Brille sitzenden Versuchsperson stehen die beiden Projektoren mit Unterbrechersystem, die der Darbietung des Testfeldes dienen, links steht der Vergleichsfeld-Projektor, dessen Bild von beiden Augen gleich wahrgenommen wird. In seiner Helligkeit kann es von der Versuchsperson variiert werden.



(M = Motor , Pr = Projektor , S = Sektorenscheibe , G = Graukeil)

a) Die Projektoren 1 und 2 entwerfen jeweils einen der beiden Halbkreise. Die beiden Halbkreise lassen sich durch Verschieben zur Deckung bringen. Es entsteht dann der schraffierte Halbkreis des nebenstehenden Schemas.

b) Die Sektorenscheibe vor Projektor 1 läuft phasengleich mit der vor dem rechten Auge, die Sektorenscheibe vor Projektor 2 phasengleich mit der vor dem linken Auge. Vor Projektor 3 läuft keine Sektorenscheibe, ihm ist ein Graukeil vorgeschaltet. Die Projektoren 1 und 2 entwerfen den schraffierten Halbkreis, Projektor 3 entwirft den leeren Halbkreis

Abb. 2: Schema der Versuchsanordnung.

2. Versuchspersonen

Die Versuche wurden mit 43 augengesunden Versuchspersonen durchgeführt, deren Alter zwischen 18 und 60 Jahren lag. Sie hatten alle, zum Teil nach Korrektur eines geringen Refraktionsfehlers normale Sehschärfe auf beiden Augen. Die Dominanz hinsichtlich der Richtungslokalisation beim binocularen Sehakt wurde bei allen mit dem ROSENBACH'schen Visierversuch und der Methode nach MILES bestimmt. Beide Untersuchungen zeigten stets dasselbe Ergebnis. 24 Versuchspersonen hatten ein führendes rechtes Auge, 16 ein führendes linkes Auge und 3 Versuchspersonen zeigten keine Dominanz. Bei der Auswahl dieser 43 Versuchspersonen wurde berücksichtigt, daß eine möglichst große Zahl von Rechts- und Linksäugigkeit vorhanden sein müsse. Das Verhältnis 24 : 16 ist deshalb gegenüber einer zufälligen Verteilung der Dominanz zu Gunsten der Linksäugigkeit verschoben.

3. Versuchsanordnung:

Die Versuchsperson saß in 2 m Abstand vor einer frontoparallelen, weißen Projektionsfläche auf einem Stuhl, das Kinn ruhte auf der Kinnstütze der „Brille", die Stirn wurde an das Gehäuse der Sektorenscheibe gelehnt, die Durchblicköffnungen der Gehäuse waren so vor die Augen gebracht, daß die Pupille in die Mitte dieser Öffnungen zentriert war. Falls notwendig durfte die Versuchsperson ihre eigene Brille aufbehalten. Auf eine künstliche Pupille konnte verzichtet werden, da mögliche Schwankungen der Pupillenweite in dem Leuchtdichtebereich, der für die Untersuchungen gewählt wurde, keine Änderung des Reizwertes der beobachteten Felder zur Folge haben konnte.

Sorgfalt wurde darauf verwandt, von den Projektoren kein Fremdlicht an die Projektionsfläche oder an die Augen der Versuchsperson kommen zu lassen. Dazu war eine völlige Abdeckung der Projektoren mit schwarzen Tüchern notwendig.

Ein Fixationspunkt war nicht nötig, da die Helligkeitseinstellung auch ohne dies Hilfsmittel mit fovealer Sehweise erfolgte. Die Augen orientierten sich dabei an der Grenze zwischen Test- und Vergleichsfeld, die dem Horizontalmeridian des Gesichtsfeldes entsprach.

4. Versuchsgang

Die eigentliche Untersuchung begann damit, daß beiden monocularen Feldern die gleiche Leuchtdichte von 2 asb gegeben wurde. Die Leuchtdichte für das eine Auge blieb im ersten Teil des Versuches konstant, die Leuchtdichte für das andere Auge senkte der Versuchsleiter stufenweise in Bruchteilen von log. Einheiten mit Hilfe von Neutralgraugläsern der Firma SCHOTT. Diese Leuchtdichteverringerung wurde nacheinander in Stufen von 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; und 10,0 log. Einheiten durchgeführt; das am stärksten lichtabsorbierende Filter verringerte also die Leuchtdichte für das eine Auge auf 2×10^{-10} asb, was praktisch voller Dunkelheit entspricht.

Bei jeder dieser durch den Versuchsleiter vorgenommenen Leuchtdichteeinstellung

des Testfeldes hatte die Versuchsperson die Leuchtdichte des Vergleichsfeldes durch Verschieben des Graukeils so einzustellen, daß ihr die Helligkeit des Vergleichsfeldes genau gleich der des Testfeldes erschien. Da der Farbton der beiden Halbfelder oben und unten völlig gleich war (es wurden gleichartige Niedervoltglühlampen als Lichtquelle benützt), verschwand dann der Trennungsstrich zwischen Test- und Vergleichsfeld für die Versuchsperson. Aus vier Einstellungen wurde der Mittelwert gebildet. Dieser Leuchtdichtewert war ein Maß für die Helligkeitsempfindung, die zwei unterschiedliche monoculare Leuchtdichten als Gesamteindruck auslösen. Die Versuchsperson wurde aufgefordert, sich bei den Einstellungen Zeit zu lassen und alles ihr Auffallende zu berichten. Längeres Beobachten und Schweifenlassen des Blicks über die gesamte kreisförmige Fläche des Bildes schien die Aufgabe, das Vergleichsfeld auf gleiche Helligkeit mit dem Testfeld einzustellen, zu erleichtern.

Im zweiten Teil der Untersuchung erhielt die konstante Leuchtdichte dasjenige Auge, für das die Leuchtdichte vorher stufenweise verringert worden war. Der Untersuchungsgang war völlig gleich dem des ersten Teils des Versuchs. Es wurden genau dieselben Filter benutzt, um hier keine Fehlerquelle zu schaffen.

Bei einigen Versuchspersonen wurden die Untersuchungen an verschiedenen Tagen wiederholt, um die Ergebnisse zu sichern und die individuelle Streuung zu bestimmen.

5. Zusätzliche Untersuchungen in anderen Leuchtdichtebereichen

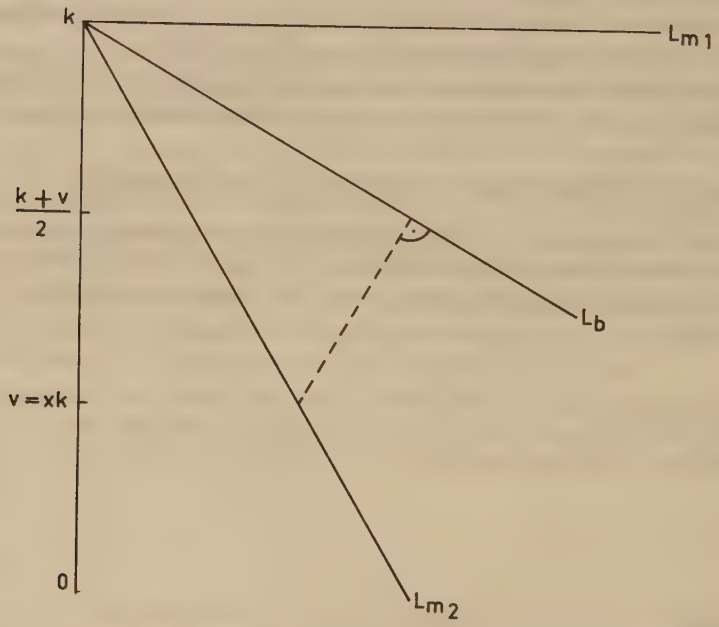
Bei 15 in bezug auf die Ergebnisse des Hauptuntersuchungsganges für das Kollektiv repräsentativen Versuchspersonen wurden die Versuche noch in zwei anderen Leuchtdichtebereichen wiederholt. Dabei waren die Ausgangsleuchtdichten 0,2 asb und 0,01 asb.

DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE

1. Darstellungsart

Zur Erklärung der Darstellungsart diene folgende Zeichnung:

Abb. 3



L_{m1} und L_{m2} stellen die beiden monocularen Leuchtdichten dar. Die Strecke $\overline{ok}$ ist ist eine Meßskala; L_{m1} hat also immer den konstanten Betrag k. L_{m2} ist veränderlich und kann Werte von O bis k annehmen, zum Beispiel den Wert v = xk. Die der binocularen Helligkeitsempfindung entsprechende Leuchtdichte L_b ist in dieser Zeichnung als das arithmetische Mittel der monocularen Leuchtdichten L_k und L_v dargestellt. Ihr Betrag ist, wie aus der Zeichnung ersichtlich, leicht zu gewinnen.

In der graphischen Darstellung der Ergebnisse sind auf der Abszisse die Werte von

$\log \frac{L_v}{L_k}$, auf der Ordinate die Werte von $\log \frac{L_b}{L_k}$ abgetragen.

Die Abszissenwerte kennzeichnen also direkt die Abnahme der stufenweise verringerten Leuchtdichte L_v, die Ordinatenwerte die Abnahme des binocularen Helligkeitseindrucks L_b bezogen auf die konstante Leuchtdichte L_k. Die Kurven stellen somit die binoculare Helligkeitsempfindung als Funktion der stufenweise verringerten Leuchtdichte L_v für das eine Auge bei konstanter Leuchtdichte L_k für das andere Auge dar.

2. Ergebnisse

In den Abbildungen 4a und 4b sind die Einzelergebnisse der 40 Versuchspersonen dargestellt, die eine Dominanz in der Richtungslokalisation aufwiesen. Die binoculare Helligkeitsempfindung nimmt mit der verringerten Leuchtdichte L_v ab bis zu einer Verminderung dieser Leuchtdichte um 0,8 log. Einheiten und bleibt von da an fast unverändert. Die Streuung der Ergebnisse nimmt mit der Abnahme der verringerten Leuchtdichte L_v zu; bei einer Verminderung der Leuchtdichte L_v um mehr als 0,6 log. Ein-

Abb. 4 a und 4 b: Einzelergebnisse von 40 Versuchspersonen
L_k = 2 asb, a) führendes Auge: konstante Leuchtdichte L_k
b) führendes Auge: verringerte Leuchtdichte L_v
Abszisse: Verhältnis der monocularen Leuchtdichten $\log \frac{L_v}{L_k}$
Ordinate: Abnahme des binocularen Helligkeitseindrucks $\log \frac{L_b}{L_k}$

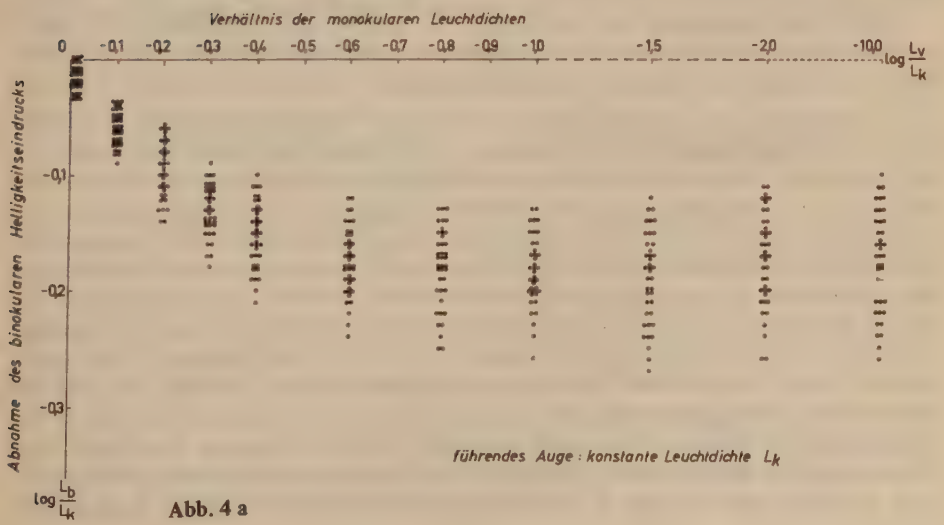


Abb. 4 a

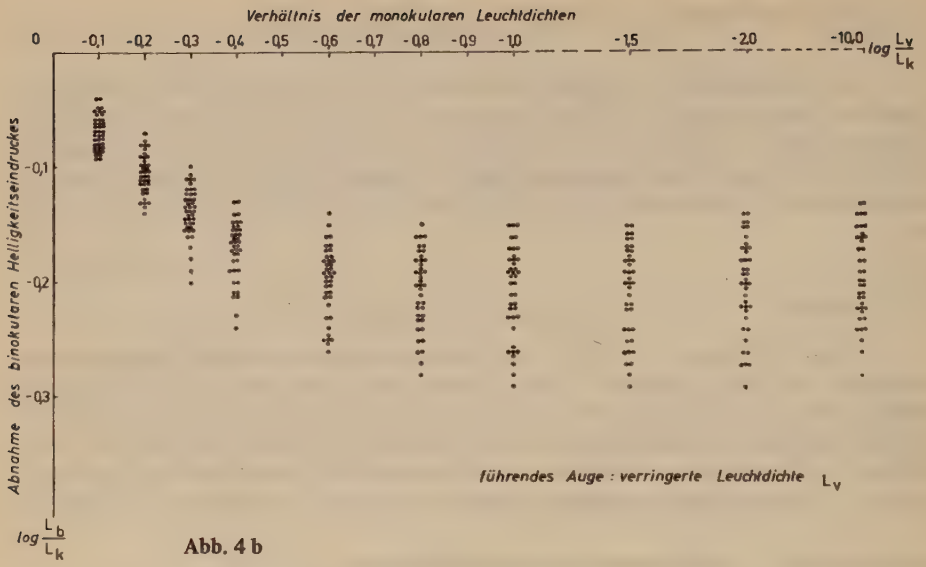


Abb. 4 b

heiten wurde von den meisten Versuchspersonen „binocularer Glanz" des Testfeldes angegeben, bei einer Verminderung um mehr als 1 log. Einheit kam es zu eindeutigen Wettstreiterscheinungen zwischen den beiden monocularen Feldern. Das Ausmaß des Wettstreits schien davon abhängig, ob dem dominanten Auge die konstante Leuchtdichte L_K oder die verringerte Leuchtdichte L_V angeboten wurde. Im letzteren Fall waren die Wettstreiterscheinungen bei der Einstellung des Vergleichsfelds störender.

Die Mittelwertskurven der Abbildungen 4a und 4b sind in Abbildung 5a dargestellt. Der zwischen den beiden Kurven bestehende Unterschied beruht auf dem Einfluß der Dominanz und ist signifikant, wie das Ergebnis des t-Tests in Abbildung 5b beweist.

Abbildung 6 zeigt, in welchem Maß bei unseren Versuchspersonen der Dominanz in der Richtungslokalisation eine Dominanz in der Helligkeitsempfindung entspricht. Der Einfluß der Dominanz in der Richtungslokalisation auf die binoculare Helligkeitsempfindung ist individuell sehr unterschiedlich ausgeprägt, wie aus den Beispielen der Abbildungen 7a, 7b, 7c, 7d, 7e und 7f deutlich wird. (Die Kurven sind in ihrem ganzen Verlauf einheitlich gezeichnet, obwohl der Maßstab der Abszisse ab einer Verminderung der Leuchtdichte L_V um 1 log. Einheit verändert ist.) Bei den in den Abbildungen 7a und 7b dargestellten Ergebnissen betreffen monoculare Vorherrschaft in der Richtungslokalisation und in der binocularen Helligkeitsempfindung dasselbe Auge, in den Abbildungen 7c und 7d wird diese Übereinstimmung nicht deutlich. Abbildung 7e zeigt die Kurven dreier Versuchspersonen, bei denen der größeren Wertigkeit eines Auges in der Richtungslokalisation eines binocular gesehenen Bildes die kleinere Wertigkeit eben dieses Auges bei der binocularen Helligkeitsempfindung entspricht. Aus Abbildung 7f wird deutlich, daß von den 3 Versuchspersonen, die kein führendes Auge in der

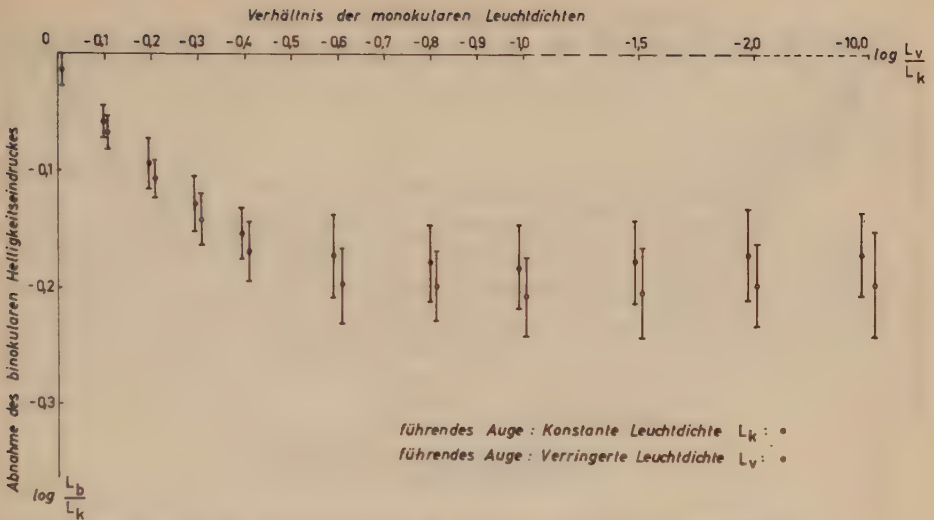


Abb. 5 a: Mittelwerte der Abb. 4 a (●) und der Abb. 4 b (○) und Standardabweichung.

$\log \frac{L_v}{L_k}$	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,6	-0,8	-1,0	-1,5	-2,0	-10,0
P <	0,025	0,025	0,020	0,010	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005

Abb. 5 b: Prüfung der Unterschiedssignifikanz mit dem t-Test für die Ergebnispaare der Abb. 5 a.

Dominanz in	
Richtungslokalisation	binok. Helligkeitswahrnehmg.
	davon:
bei (40) Vpn vorhanden	(24) gleichsinnig (60%)
	(13) nicht vorhanden (32%)
	(3) gegensinnig (8%)
bei 3 Vpn. nicht vorhanden	2 vorhanden
	1 nicht vorhanden

Abb. 6

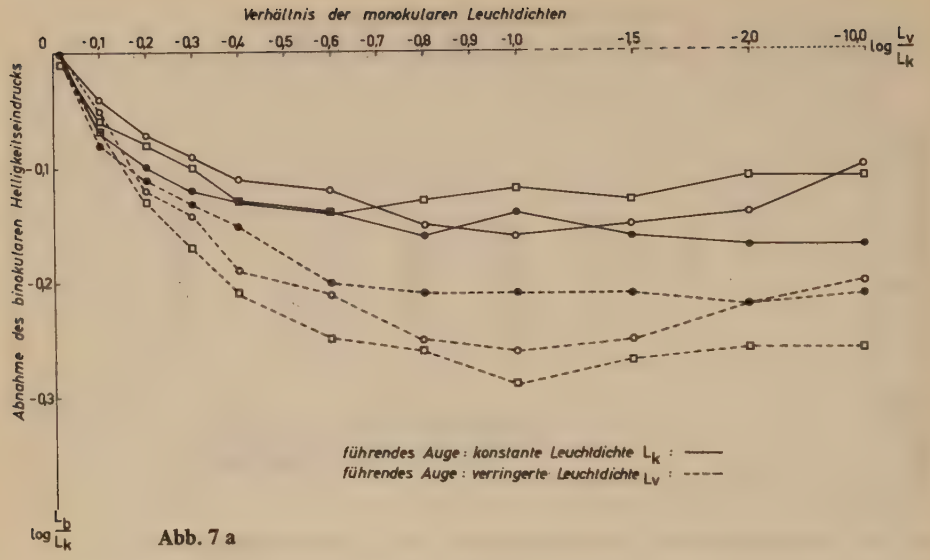


Abb. 7 a

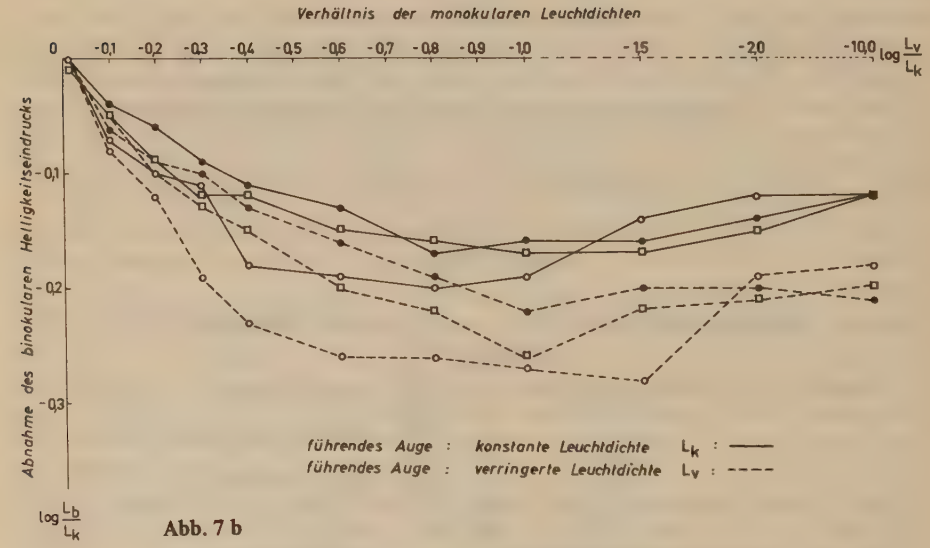


Abb. 7 b

Abb. 7 a und 7 b: Ergebnisse von 3 Versuchspersonen, bei denen Dominanz in der Richtungslokalisation und Dominanz in der binocularen Helligkeitswahrnehmung dasselbe Auge betreffen. Koordinaten wie in den vorhergehenden Abbildungen. $L_K = 2$ asb.

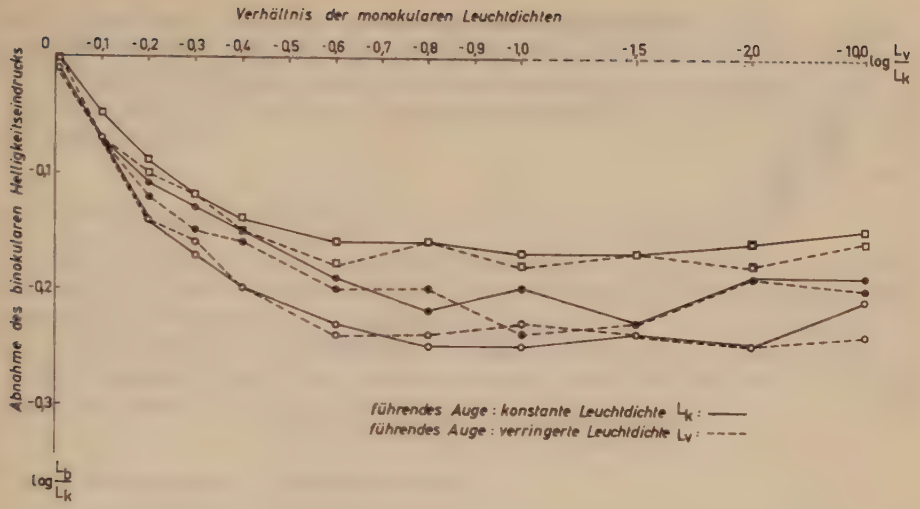


Abb. 7 c

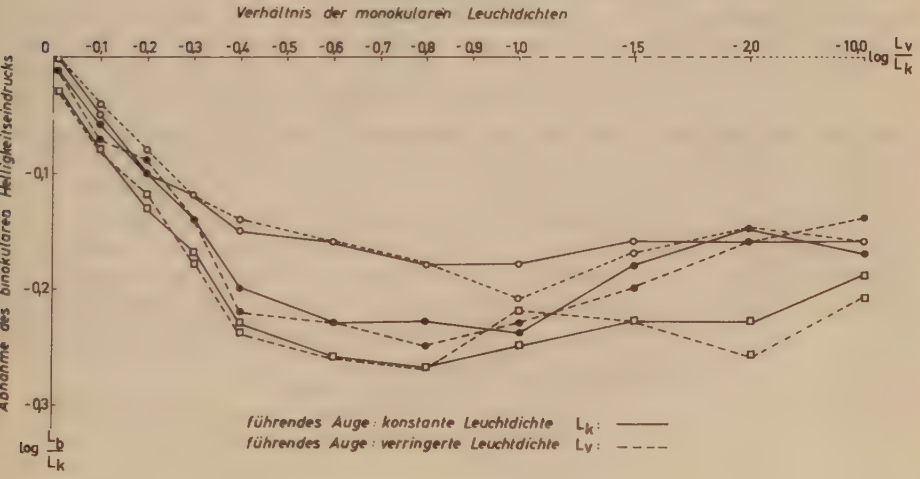


Abb. 7 d

Abb. 7 c und 7 d: Ergebnisse von 3 Versuchspersonen, bei denen einer Dominanz in der Richtungslokalisation keine Dominanz in der binocularen Helligkeitswahrnehmung entspricht. Koordinaten wie in den vorhergehenden Abbildungen. L_k = 2 asb.

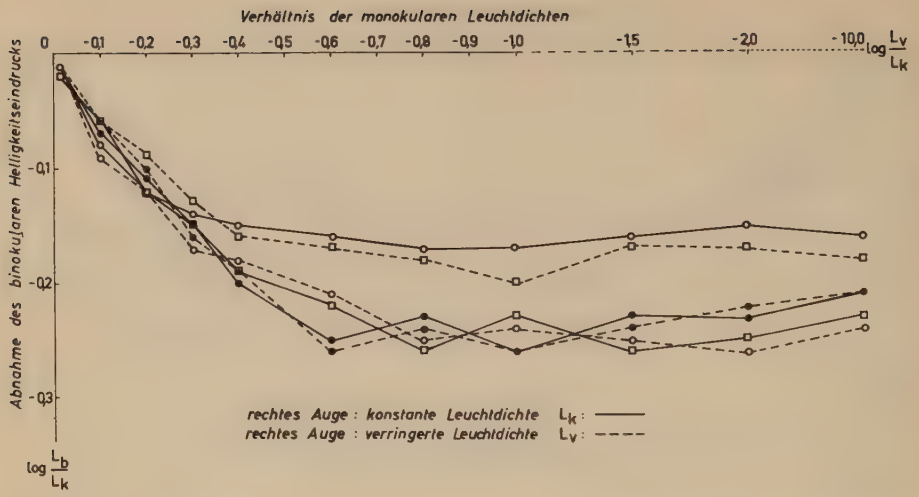


Abb. 7 e: Ergebnisse von 3 Versuchspersonen, bei denen einer Dominanz in der Richtungslokalisation gegensinnige Dominanz in der binocularen Helligkeitswahrnehmung entspricht. Koordinaten wie in den vorhergehenden Abbildungen. $L_k = 2$ asb.

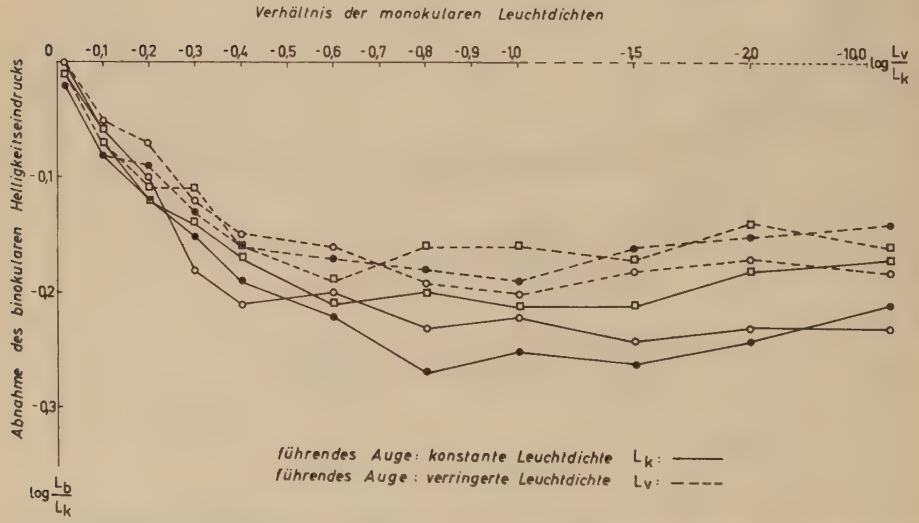


Abb. 7 f: Ergebnisse von 3 Versuchspersonen, bei denen keine Dominanz in der Richtungslokalisation festzustellen war. Koordinaten wie in den vorhergehenden Abbildungen. $L_k = 2$ asb.

Richtungslokalisation hatten, nur eine keine Dominanz bei der binocularen Helligkeitsempfindung zeigt. Bis zu einer Verminderung der Leuchtdichte L_v um 0,6 log. Einheiten nimmt bei all diesen Personen die binoculare Helligkeitsempfindung, wenn auch verschiedengradig, ab, bei größerer Verminderung verlaufen die Kurven dann individuell sehr unterschiedlich.

3. Wiederholbarkeit der Ergebnisse

Bei 10 Versuchspersonen wurden die Messungen an mehreren Tagen wiederholt. Die Abbildungen 8a und 8b zeigen die Streuung der Ergebnisse zweier Versuchspersonen bei sechs Untersuchungen an weit auseinander liegenden Tagen. Aus der geringen Streuung ist zu sehen, daß der individuelle Kurvenverlauf wie auch der Dominanzfluß bei diesen Versuchspersonen in allen Versuchen gewahrt bleibt. Die Wiederholung der Messungen bei anderen Versuchspersonen erbrachte das gleiche Ergebnis.

4. Ergebniss in anderen Leuchtdichtebereichen

Bei 15 Versuchspersonen wurden außer bei $L_k = 2$ asb noch zusätzliche Messungen bei $L_k = 0{,}2$ asb und $L_k = 0{,}01$ asb durchgeführt. Die größere Streuung der Einzelmessungen für jedes Testfeldleuchtdichtepaar (Abb. 9a und 9b) sowie die größere Streuung der Mittelwerte der 15 Versuchspersonen erklären, warum in den Ergebnissen bei $L_k = 0{,}01$ asb kein Dominanzeinfluß zu finden ist. Wie aus Abbildung 10 ersichtlich, verlaufen die Kurven für die drei verschiedenen Leuchtdichtebereiche untereinander annähernd gleich, der Dominanzeinfluß ist in den Ergebnissen der Versuche bei $L_k = 2$ asb und $L_k = 0{,}2$ asb deutlich zu erkennen. Abbildung 11 zeigt als Funktion der Abnahme der Leuchtdichte L_v die Größe der Standardabweichung der Ergebnisse des Versuchs am Gesamtkollektiv, der Versuche mit 15 Personen bei $L_k = 2$ asb und $L_k = 0{,}01$ asb und der sechsmaligen Untersuchung einer Versuchsperson. Die größte Streuung weisen die Ergebnisse der Versuche mit 15 Personen bei $L_k = 0{,}01$ asb, die kleinste die bei sechsmaliger Wiederholung des Versuchs mit einer Person bei $L_k = 2$ asb auf. Immer nimmt die Streuung bis zu einer Verminderung der Leuchtdichte L_v um 0,6 log. Einheiten zu und bleibt von da an fast unverändert.

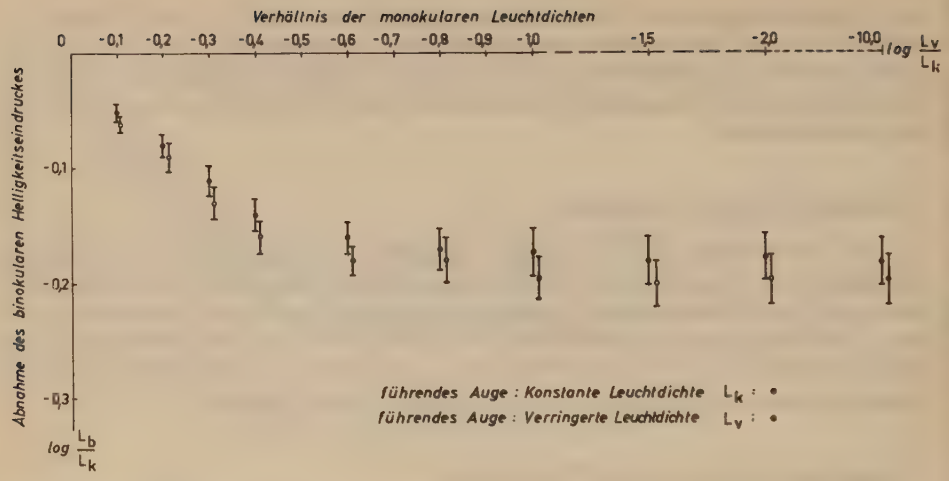


Abb. 8 a

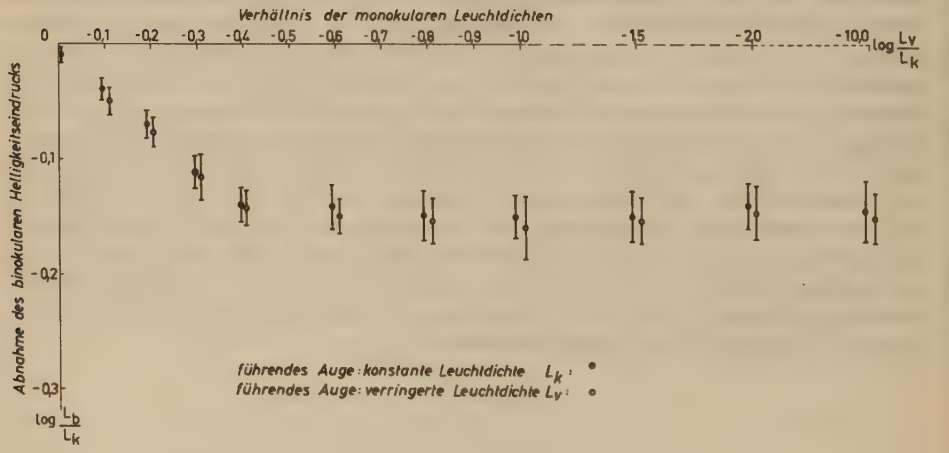


Abb. 8 b

Abb. 8 a und 8 b: Streuung der Versuchsergebnisse bei sechsmaliger Wiederholung der Untersuchung einer Versuchsperson
a) mit deutlichem Dominanzeinfluß auf die binoculare Helligkeitswahrnehmung
b) ohne deutlichen Dominanzeinfluß auf die binoculare Helligkeitswahrnehmung
Koordinaten wie in den vorhergehenden Abbildungen. L_k = 2 asb.

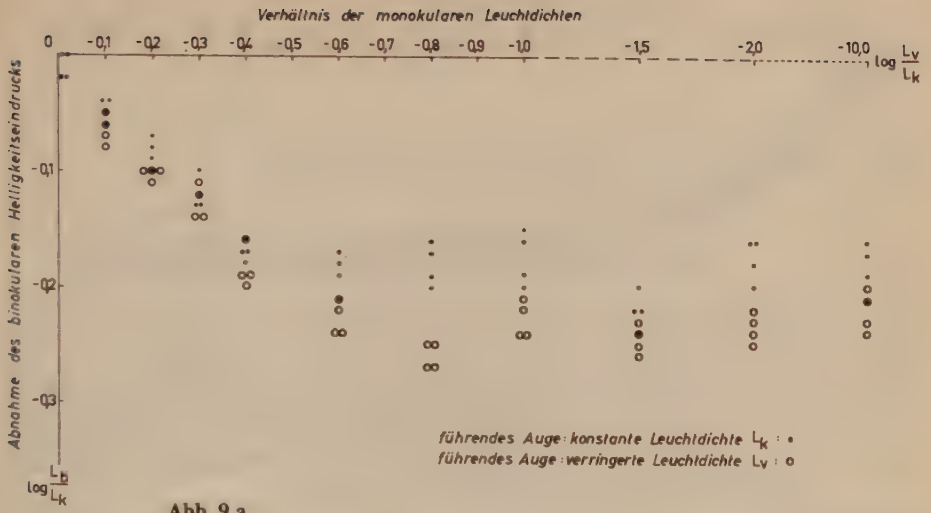


Abb. 9 a

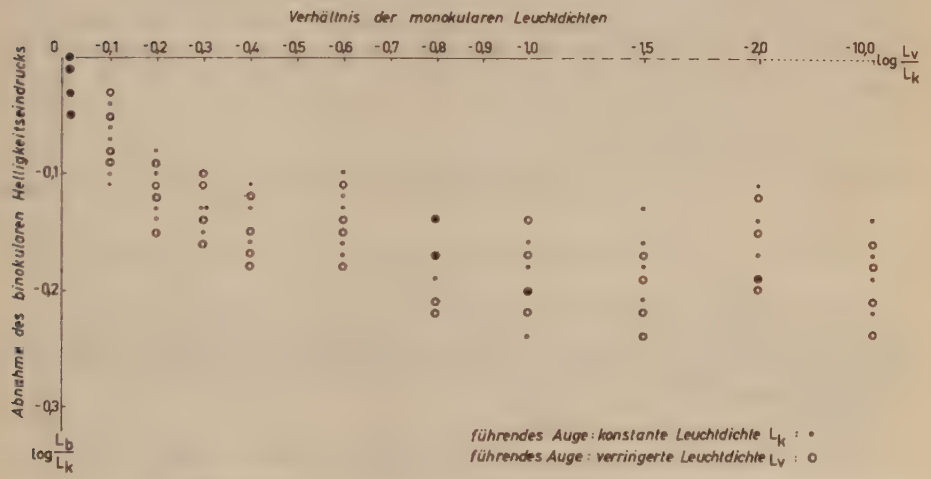


Abb. 9 b

Abb. 9 a und 9 b: Einzeleinstellungen einer Versuchsperson bei
a) $L_k = 2$ asb
b) $L_k = 0{,}01$ asb

Koordinaten wie in den vorhergehenden Abbildungen.

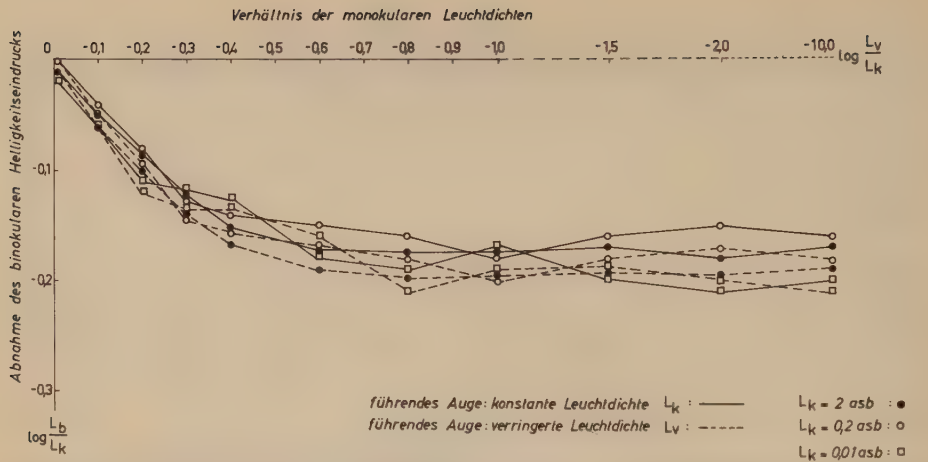


Abb. 10: Mittelwerte von 15 Versuchspersonen, bei denen die Untersuchung für verschiedene Werte von L_k durchgeführt wurde. Koordinaten wie bisher.

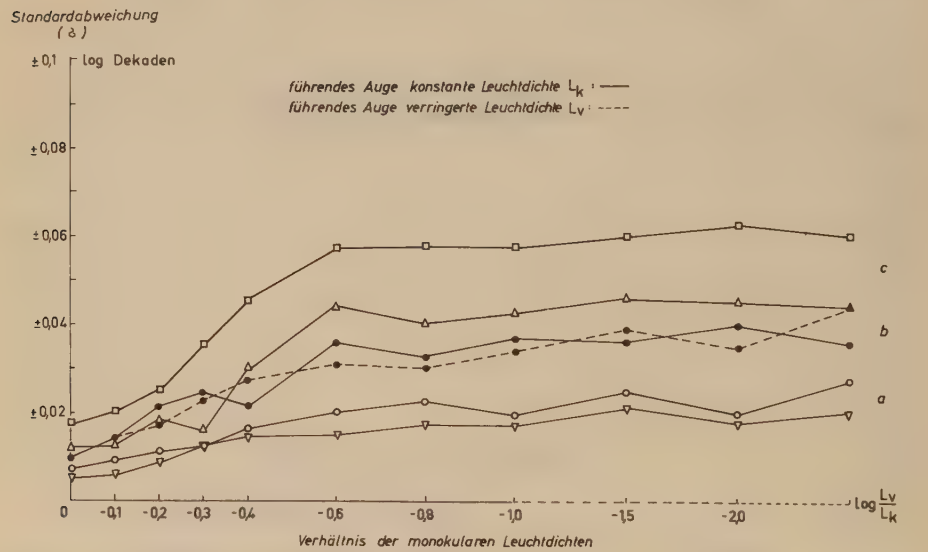


Abb. 11: Vergleich der Standardabweichungen
a) je 6 Versuche bei 2 Versuchspersonen, L_k = 2 asb.
b) Versuch am Gesamtkollektiv, L_k = 2 asb.
führendes Auge: konstante Leuchtdichte L_k ——
führendes Auge: verringerte Leuchtdichte L_v ------
c) Versuche an 15 Versuchspersonen bei
L_k = 2 asb (△) und L_k = 0,01 asb (□).
Abszisse wie in den vorhergehenden Abbildungen, Ordinate: Standardabweichung.

BESPRECHUNG DER ERGEBNISSE

Zunächst seien die Ergebnisse in drei Punkten zusammengefaßt:

1. Bietet man einem Auge eine konstante Leuchtdichte und dem anderen gleichzeitig eine stufenweise verringerte Leuchtdichte, so nimmt die binoculare Helligkeitsempfindung mit der verringerten Leuchtdichte ab bis zu deren Verminderung um etwa 0,8 log. Einheiten und bleibt von da an fast unverändert. Ihr Wert liegt immer etwa in der Mitte zwischen dens Beträgen der beiden monocularen Leuchtdichten, verschiedene Beträge der konstanten Leuchtdichte haben darauf keinen Einfluß.

2. Führt man diesen Versuch für beide Augen völlig gleich durch, so ist die binoculare Helligkeitsempfindung bei einem Kollektiv von 40 Versuchspersonen signifikant größer, wenn das in der Richtungslokalisation eines binocular gesehenen Bildes dominante Auge die konstante, also größere Leuchtdichte erhält. Dieser Einfluß der Dominanz auf die binoculare Helligkeitsempfindung ist auch noch bei einem Kollektiv von 15 für die Ergebnisse des Hauptversuchs repräsentativen Versuchspersonen deutlich, nicht mehr allerdings bei einem sehr kleinen Wert der konstanten Leuchtdichte von 0,01 asb.

3. Bei den einzelnen Versuchspersonen bestehen hinsichtlich der Dominanzauswirkung große Unterschiede; diese Ergebnisse sind reproduzierbar.

Diese drei Punkte sollen nun nacheinander besprochen werden.

Der Erfahrung, daß die binoculare Helligkeitsempfindung etwa dem arithmetischen Mittel unterschiedlicher monocularer Helligkeiten entspricht, steht das bekannte FECHNER'sche Paradoxon auf den ersten Blick widersprüchlich gegenüber. FECHNER beschreibt folgende Situation: Man beobachtet ein Objekt bestimmter Helligkeit binocular, aber mit einem Graufilter vor einem Auge. Schließt man nun eben dieses Auge, so nimmt der Helligkeitseindruck des Objektes zu, obwohl der Gesamtbetrag der Lichtreize für beide Augen kleiner wird.

Beiden Erkenntnissen versuchte SCHRÖDINGER [1926] mit folgender Formel, die bis in die jüngste Vergangenheit als gültig angesehen wurde, gerecht zu werden:

$$L_b = \frac{L_r^2 + L_l^2}{L_r + L_l} \qquad (1)$$

L_r und L_l stellen die Leuchtdichten dar, die dem rechten bzw. dem linken Auge geboten werden. L_b ist die dem binocularen Helligkeitseindruck entsprechende Leuchtdichte.

LEVELT formulierte das Ergebnis seiner Versuche: die binoculare Helligkeitsempfindung ist konstant, solange die Summe gewogener monocularer Leuchtdichten konstant gehalten wird, wie folgt:

$$L_b = w_r L_r + w_l L_l \qquad (2)$$

w_r und w_l sind Gewichtskoeffizienten, die den proportionalen Anteil beider Augen am gemeinsamen Helligkeitseindruck verdeutlichen. Ihre Summe ist demnach 1, ihre Werte werden hauptsächlich durch Konturinformation, bei gleicher Konturinformation für beide Augen durch die Dominanz bestimmt und sind dann konstant für die einzelne Versuchsperson.

Sein Gewichtskoeffizientenmodell führte LEVELT zu folgender Erklärung des FECHNER'schen Paradoxons: wird bei binocularer Betrachtung eines Gegenstandes der Helligkeit L vor ein Auge, zum Beispiel das rechte, ein Filter gebracht, so ist die binoculare Helligkeitsempfindung $L_b = w_l L + w_r t L$, wobei t die Filtertransmission bedeutet. Wird nun das rechte Auge geschlossen, so überwiegt die Konturinformation für das linke bei weitem, w_l gewinnt den Wert 1. Die jetzt empfundene Helligkeit L'_b ist dann gleich L. Da $w_l + w_r = 1$ und t kleiner als 1 ist, folgt, daß $w_l + w_r t$ kleiner als 1 ist. L'_b ist dann also größer als L_b, der Helligkeitseindruck nimmt zu, wenn das rechte Auge geschlossen ist. Voll gültig ist diese Erklärung nach LEVELT nur, wenn sehr kleine Testfelder von 1^0 Größe gegeben werden. Nur dann ist die Konturinformation dieses Testfeldes ausreichend, den Wert des Gewichtskoeffizienten des offenen Auges auf 1 ansteigen zu lassen. LEVELT weist dies experimentell nach. Bei größerem Testfeld wäre L'_b zwar dann kleiner als L, kann aber bei entsprechend kleiner Filtertransmission immer noch größer sein als L_b.

In ENGEL's Experimenten stellte sich die binoculare Helligkeitsempfindung annähernd als Funktion der vektoriellen Summe monocularer Helligkeitsschätzwerte und örtlicher Kreuzkorrelation der von ENGEL verwandten monocularen Testfeldmuster heraus. Unter Anwendung von STEVENS' „power function" formulierte ENGEL sein Ergebnis für Leuchtdichten folgendermaßen:

$$L_b{}^{2^n} = w_r (L_r{}^2)^n + w_l (L_l{}^2)^n, \qquad (3)$$

wobei n, der „power function"-Exponent, den Wert 1/3 hat, w_r und w_l sind wiederum Gewichtskoeffizienten. ENGEL schlägt zur Bestimmung ihres Wertes ein mathematisches Modell vor; danach ist der Anteil eines Auges an der binocularen Helligkeitsempfindung proportional dem Gesamtbetrag von Kontur und Kontrast in diesem Auge, bezogen auf die Konturkontrastverhältnisse im anderen Auge. Bei allen von ENGEL verwandten kreuzförmigen Testfeldmustern, die fünf, binocular beliebig zu kombinierende Felder unterschiedlicher Leuchtdichten enthielten, erwies sich der berechnete Anteil beider

Augen als gleich. ENGEL nahm deshalb an, daß im Verlauf seines Versuches über 3 log. Einheiten die Gewichtskoeffizienten unverändert den Wert 1/2 hatten. Für die binoculare Mischung der Einzelfelder dieser Muster muß diese Annahme bezweifelt werden. Zwar hält auch LEVELT die Reizstärke eines Musters durch die Kontur- und Kontraststärke innerhalb des Musters für gegeben, weist aber experimentell nach, daß der Einfluß der Kontur auf den binocularen Helligkeitseindruck nur in ihrer unmittelbaren Umgebung besteht. Zudem ist bekannt, daß jede Netzhautstelle entsprechend der auf ihr lagernden Leuchtdichte für sich adaptiert, damit ihre eigene Konturinformation erfährt und dadurch der Gewichtskoeffizient für sie bestimmt ist. Bei Drehung des Musters auf einem Auge ändert sich also das Verhältnis der Gewichtskoeffizienten auf korrespondierenden Netzhautstellen. Es scheint also nicht erlaubt, für die binoculare Kombination der Einzelfelder die Gewichtskoeffizienten als durch die Gesamtkonturinformation eines Musters bestimmt anzusehen. Selbst aus ENGEL's Meßergebnissen geht schließlich hervor, daß bei großen Leuchtdichteunterschieden der monocularen Einzelfelder das Feld der größeren Leuchtdichte relativ mehr zur binocularen Helligkeitsempfindung beiträgt, der Wert des Gewichtskoeffizienten für das betreffende Feld also größer als 1/2 sein muß.

Bedenkt man, daß der für die Differenzierung der Modelle LEVELT's und ENGEL's relevante Bereich maximal 0,15 log. Einheiten umfaßt, so überrascht es nicht, daß ENGEL's Ergebnisse bei einer Streuung der Leuchtdichten der Einzelfelder seiner Muster von 0,14 log. Einheiten und einer Standardabweichung von etwa 0,2 log. Einheiten eine bemerkenswert schwache Stütze seines Vektorsummenmodells abgeben. ENGEL zitiert deshalb Ergebnisse von ERNITZ, der, um Kontureinflüsse auf die Gewichtskoeffizienten auszuschalten, LEVELT's Versuche mit konturlosen Ganzfeldern wiederholte. Nach diesen ist die binoculare Helligkeitsempfindung trotz konstantem Wert 1/2 der Gewichtskoeffizienten während der ganzen Untersuchung keine lineare Funktion der unterschiedlichen monocularen Leuchtdichten, sondern folgt der in Gleichung 3 vorgeschlagenen Gesetzmäßigkeit. Vergleicht man aber die nach Gleichung 3 als Vektorsumme der monocularen Leuchtdichten und die als Vektorsumme der monocularen Helligkeitsschätzwerte berechnete binoculare Helligkeitsempfindung, so stellt sich letztere als durchschnittlich bis zu 0,2 log. Einheiten größer heraus; erstere ist stets kleiner, letztere stets größer als die binoculare Helligkeitsempfindung, die dem arithmetischen Mittel der monocularen Leuchtdichten entspräche.

Diese Diskrepanz sowie die mangelnde Aussagekraft seiner Ergebnisse lassen ENGEL's Vorstellungen weniger fundiert erscheinen als die LEVELT's.

Um unsere Ergebnisse mit den Modellen SCHRÖDINGER's, LEVELT's und ENGEL's vergleichen zu können, müssen die Gleichungen 1, 2, 3 unseren Versuchsbedingungen gemäß gestaltet werden. Für die während des Versuchs konstant gehaltene Leuchtdichte steht L_k, die stufenweise verringerte monoculare Leuchtdichte L_v ist gleich $x\ L_k$, wobei $x \leqq 1$. Für beide Gewichtskoeffizienten wird der Wert 1/2 gesetzt. Die Gleichungen sehen umgeformt wie folgt aus:

$$L_b = L_k \left(\frac{1 + x^2}{1 + x}\right) \qquad (1a)$$

$$L_b = L_k \left(\frac{1 + x}{2}\right) \qquad (2a)$$

$$L_b = L_k \left(\frac{1 + x^{\frac{2}{3}}}{2}\right)^{\frac{3}{2}} \qquad (3a)$$

Auf der Abszisse (Abb. 12a) sind die Werte von log. $x = \log. \frac{L_v}{L_k}$ und auf der Ordinate die Werte von log. $\frac{L_b}{L_k}$ abgetragen.

Die Kurven stellen also die Abnahme des binocularen Helligkeitseindrucks als Funktion von x dar.

In Abbildung 12a bilden die Kurven unserer Ergebnisse, die arithmetischen Mittelwerte des Gesamtkollektivs, die Begrenzung des schraffierten Bereichs. Für die obere Begrenzung ist die Leuchtdichte des in der Richtungslokalisation dominanten Auges die konstante Leuchtdichte L_k, für die untere ist es die verringerte Leuchtdichte L_v. (In dieser Abbildung sind alle Kurven durchgezogen gezeichnet, obwohl der Maßstab der Abszisse ab einer Verminderung der Leuchtdichte L_v um 1,0 log. Einheiten verändert ist.) SCHRÖDINGER's Hypothese entsprechen unsere Ergebnisse nicht, sie zeigen aber bis zu einem Wert log. x = - 0,6 gute Übereinstimmung mit den Vorstellungen LEVELT's und ENGEL's, für kleinere Werte von log. x liegen unsere Kurven dann deutlich höher. Während aber nach den Ergebnissen der bisherigen Untersuchungen bei sehr großen Unterschieden der monocularen Leuchtdichten die binoculare Helligkeitsempfindung fast der größeren monocularen Leuchtdichte entspricht, nach LEVELT durch die überwiegende Konturinformation des monocularen Feldes der größeren Leuchtdichte bedingt, ist sie hier um etwa 0,15 log. Einheiten geringer.

Eine Erklärung dieses Resultats bietet der bei Leuchtdichteunterschieden von mehr als 1 log. Einheit zwischen den beiden monocularen Feldern auftretende Wettstreit. Bei simultaner Darbietung von Test- und Vergleichsfeld wird selbst bei einem Wert 0 einer monocularen Leuchtdichte das betreffende Auge noch vom Licht des Vergleichsfeldes stimuliert; mit Abnahme der verringerten Leuchtdichte L_v nimmt der Kontrast zwischen dem Feld dieser Leuchtdichte und dem Vergleichsfeld entgegengesetzt dem Kontrast zwischen dem Feld der konstanten Leuchtdichte L_k und dem Vergleichsfeld zu, es kommt zu verstärktem Wettstreit der beiden monocularen Felder. Die größere monoculare Leuchtdichte kann dann nicht so entscheidend zum binocularen Helligkeits-

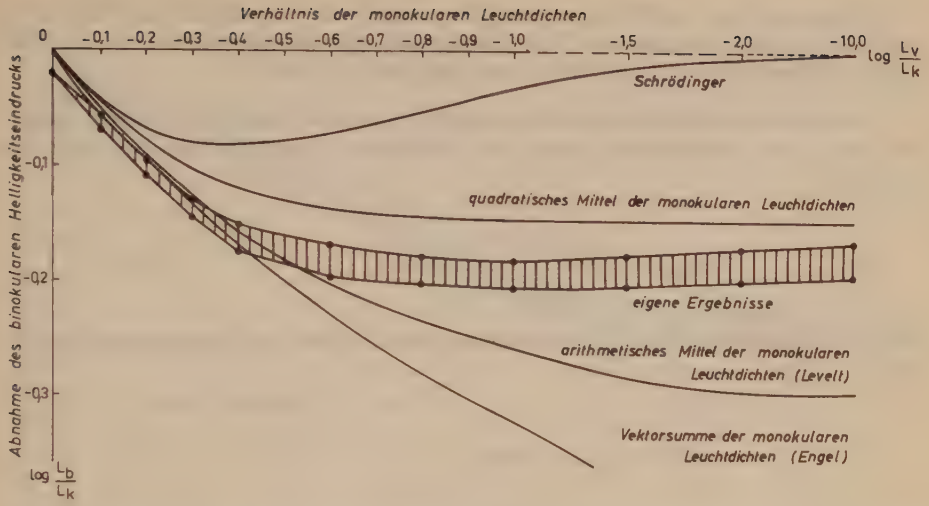


Abb. 12 a: Vergleich der Versuchsergebnisse mit theoretischen Möglichkeiten der binocularen Helligkeitsintegration.

Obere Begrenzung des schraffierten Bereichs:
führendes Auge: konstante Leuchtdichte L_k

Untere Begrenzung des schraffierten Bereichs:
führendes Auge: verringerte Leuchtdichte L_v

Abszisse: Verhältnis der monocularen Leuchtdichten log. $\frac{L_v}{L_k}$

Ordinate: Abnahme des binocularen Helligkeitseindrucks log. $\frac{L_b}{L_k}$

Die Kurven sind in ihrem ganzen Verlauf durchgezogen gezeichnet, obwohl der Maßstab der Abszisse ab Wert log. $\frac{L_v}{L_k} = -1{,}0$ verändert ist.

eindruck beitragen. Zudem war die Fläche des in unseren Versuchen projizierten Feldes mit 10^0 Durchmesser von einer Größe, die nach LEVELT's Experimenten über den Einfluß der Konturinformation auf den Wert der Gewichtskoeffizienten kein so krasses Überwiegen der größeren konstanten Leuchtdichte bei der binocularen Helligkeitsempfindung erwarten ließ, denn schon bei 3^0 Durchmesser des Testfeldes ist in LEVELT's Experimenten bei Wert 0 einer monocularen Leuchtdichte die binoculare Helligkeitsempfindung um 0,1 – 0,2 log. Einheiten geringer als die Leuchtdichte für das andere Auge.

Angesichts der verschiedenartigen Phänomene, denen der binoculare Helligkeitseindruck während des gesamten Untersuchungsgangs unterliegt, erscheint eine mathematische Interpretation des Kurvenverlaufs sehr problematisch.

Die binoculare Helligkeitsempfindung entspricht unter unseren Versuchsbedingungen etwa dem quadratischen Mittel der monocularen Leuchtdichten, demnach der Funktion

$$L_b = L_k \left(\frac{1 + x^2}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (4a),$$

die sich aus folgender Gleichung ableiten läßt, wenn der Wert der Gewichtskoeffizienten gleich 1/2 gesetzt wird:

$$L_b^2 = w_r L_r^2 + w_l L_l^2 \qquad (4).$$

So formuliert ist die binoculare Helligkeitsempfindung eine Funktion der Vektorsumme der monocularen Leuchtdichten. Der Wert dieses Modells ist sehr fraglich.

Nach LEVELT ist die binocular empfundene Helligkeit eine lineare Funktion der mit Gewichtskoeffizienten, die den proportionalen Anteil beider Augen am gemeinsamen Sehding ausdrücken, belegten monocularen Leuchtdichten, sofern sich diese nicht zu sehr unterscheiden. Der Wert der Gewichtskoeffizienten wird bei gleicher Konturinformation für beide Augen durch die Dominanz bestimmt. Zum besseren Vergleich unserer Ergebnisse mit dieser Aussage LEVELT's ist in Abbildung 12b in nicht-logarithmischer Darstellung die Abbildung 12a ohne die SCHRÖDINGER's Gleichung zugehörige Kurve wiederholt. Die der binocularen Helligkeitsempfindung entsprechende Leuchtdichte L_b erscheint als Funktion der verringerten monocularen Leuchtdichte L_v bei konstanter monocularer Leuchtdichte $L_k = 2$ asb.

Auf der den Koordinatenschnittpunkt schneidenden Geraden entspricht die binoculare Helligkeitsempfindung dem arithmetischen Mittel der monocularen Leuchtdichten. Gleichung 2 zugrunde gelegt, haben für diese Gerade also beide Gewichtskoeffizienten den Wert 1/2. Bei verschiedener Wertigkeit der Gewichtskoeffizienten ergäben sich zwei vom Koordinatenschnittpunkt aus divergierende Geraden. Die von uns gewonnenen Kurven schneiden sich zwar nicht im Koordinatenschnittpunkt, doch liegt dieser geringe Fehler innerhalb der Standardabweichung und kann unberücksichtigt bleiben, verlaufen aber bis zu einem Wert von $L_v = 0{,}5$ asb fast linear, sowohl wenn das dominante Auge die konstante als auch wenn es die verringerte Leuchtdichte angeboten bekommt (obere und untere Begrenzung des schraffierten Bereichs). Sie unterscheiden sich also nur durch ihre Steigung und bestätigen somit LEVELT's Ergebnisse. Die geringe Abweichung von der Linearität kann auf eine mit der Zunahme des Unterschieds der monocularen Leuchtdichten einhergehende, stetige Veränderung des Werts der Ge-

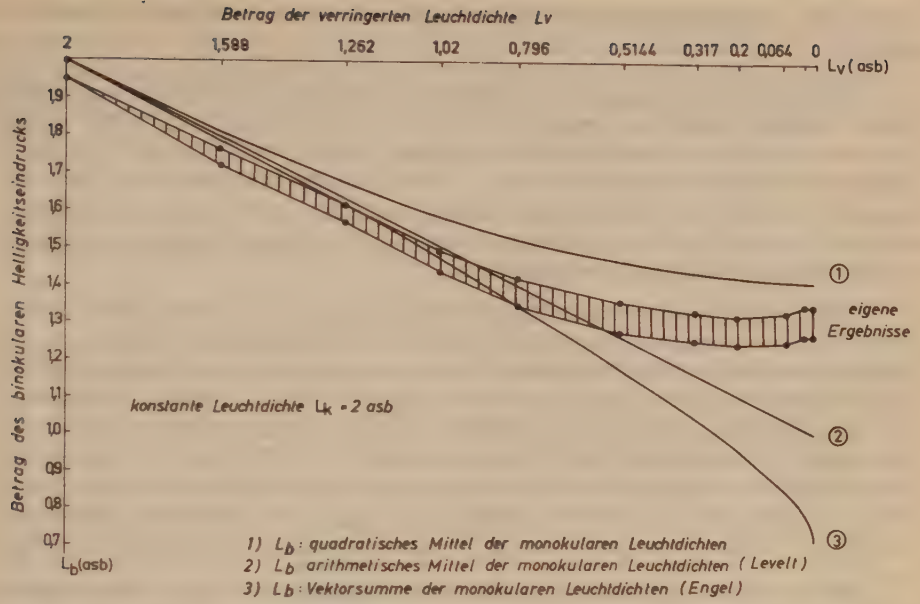


Abb. 12 b: Vergleich der Versuchsergebnisse mit theoretischen Möglichkeiten der binocularen Helligkeitsintegration.

Abszisse: Betrag der verringerten Leuchtdichte L_V.

Ordinate: Betrag der dem binocularen Helligkeitseindruck entsprechenden Leuchtdichte L_b.

Parameter wie in Abbildung 12 a.

wichtskoeffizienten – der Wert des dem helleren monocularen Feld zugehörigen Gewichtskoeffizienten nimmt auf Kosten des anderen zu – zurückgeführt werden. Diese Erklärung der Nichtlinearität unserer Kurven scheint plausibler als das mit Gleichung 4 vorgeschlagene Modell. Im weiteren Verlauf der Kurven, der Glanz- und Wettstreiterscheinungen unterliegt, ist der Dominanzeinfluß sogar noch deutlicher. Da eine völlige Verschmelzung der beiden monocularen Felder bei so großen Leuchtdichteunterschieden offenbar nicht mehr möglich ist, wird sich die Dominanz hier auch in einer zeitlichen Prävalenz des führenden Auges beim binocularen Wettstreit auswirken.

Daß sich in den Ergebnissen der Versuche mit 15 Personen bei $L_K = 0{,}01$ asb kein Dominanzeinfluß findet, ist durch die Abnahme der relativen Leuchtdichteunterschiedsempfindlichkeit bei Adaptation auf sehr kleine Leuchtdichten zu erklären.

Der beschriebene, signifikante Einfluß der nach der Richtungslokalisation festgestellten Dominanz auf die binoculare Helligkeitsempfindung gilt für das Kollektiv von 40 Versuchspersonen. Gälte er auch für die einzelne Versuchsperson, so könnten die bisherigen rein qualitativen Dominanzteste durch eine haploskopische Methode ersetzt

werden, die die Ungleichwertigkeit beider Augen beim binocularen Sehakt quantitativ erfaßte.

Die nähere Betrachtung der Ergebnisse der einzelnen Versuchspersonen gibt zu diesem Vorhaben allerdings wenig Anlaß. Von 40 Versuchspersonen, die eine sichere Dominanz in der Richtungslokalisation aufweisen, zeigen etwa 2/3 bei der binocularen Helligkeitsempfindung eine gleichsinnige, 1/3 aber keinerlei Dominanz. Bei 3 Versuchspersonen zeigt sich die Dominanz sogar gegensinnig, und von 3 Versuchspersonen ohne führendes Auge in der Richtungslokalisation bieten 2 eindeutige Dominanzauswirkung bei der binocularen Helligkeitswahrnehmung.

Selbst wenn man die beiden letztgenannten Gruppen als Ausnahme abtut, bleiben immer noch 13 Versuchspersonen, bei denen sich trotz eindeutiger Dominanz in der Richtungslokalisation bei der binocularen Helligkeitsempfindung keine Dominanz findet. Dieses Ergebnis erlaubt es nicht, von einer Dominanz in der Richtungslokalisation auf eine rein sensorische Dominanz zu schließen, auch wenn beide Formen wohl meistens miteinander gekoppelt sind. Jede Untersuchungsmethode erfaßt eben nur die Art der Dominanz, die ihr zugängig ist, wobei eine haploskopische Methode mit weniger Fehlern behaftet zu sein scheint. Die Vorherrschaft eines Auges beim binocularen Sehakt muß also für die verschiedenen Funktionen als verschieden ausgeprägt angenommen werden.

Die von uns durchgeführten Experimente unterlagen den beiden wesentlichsten Mechanismen des Binocularsehens, der binocularen Integration und dem binocularen Wettstreit. Beide sind im visuellen Cortex lokalisiert. HUBEL und WIESEL [1962], JUNG und Mitarbeiter [1957, 1961], GRÜSSER und Mitarbeiter [1963, 1965] u. a. erbrachten mit ihren Untersuchungen an Katzen die neurophysiologischen Korrelate zu den psychophysischen Phänomenen des Wettstreits der beiden Sehfelder, der Dominanz einer kontur- und kontraststarken Figur über eine kontur- und kontrastschwache und des FECHNER'schen Paradoxes.

Die Erfahrung, daß die subjektive binoculare Helligkeit etwa dem arithmetischen Mittel der beiden monocularen Helligkeiten entspricht, erklären GRÜSSER und GRÜSSER - CORNEHLS etwa wie folgt: im visuellen Cortex finden sich für jedes Auge Neurone, die durch Lichtstimulation eines Auges aktiviert und durch Belichtung des anderen Auges gehemmt werden. Die subjektive monoculare Helligkeit kann als dem mittleren Erregungsniveau dieser aktivierten Neurone entsprechend angesehen werden. Es zeigt sich nun, daß bei monocularer Belichtung zwar weniger dieser Neurone erregt werden als bei binocularer, dafür aber stärker. Die binoculare Belichtung erhöht die Zahl der aktivierten Neurone, vermindert jedoch ihre Entladungsrate, so daß das mittlere corticale Erregungsniveau kaum ansteigt; bei Verdoppelung der Beleuchtungsstärke nimmt die Entladungsrate der genannten Neurone um 10 – 30 % zu. Dies entspricht etwa der Zunahme der monocularen Aktivierung im Vergleich zur binocularen Aktivierung bei gleicher Beleuchtungsstärke. Die beiden Neuronensysteme reagieren also bei binocularer Belichtung näherungsweise so, als ob monocular jedes Auge mit der halben Beleuchtungsstärke belichtet würde. Für die Neuronenreaktionen bei verschiedenen Beleuchtungsstärken für das rechte und linke Auge gilt Analoges.

Beim Vergleich von neurophysiologischen Befunden an Säugetieren mit sinnesphysiologischen Resultaten am Menschen sind Vorbehalte angebracht, die Übereinstimmung unserer Ergebnisse mit denen von GRÜSSER und GRÜSSER-CORNEHLS [1965] ist jedoch so auffallend, daß sie als gegenseitige Bestätigung angesehen werden kann

ZUSAMMENFASSUNG

Es wird über die binoculare Helligkeitsempfindung bei Darbietung unterschiedlicher monocularer Leuchtdichten und ihre Beziehung zu der nach der Richtungslokalisation festgestellten Dominanz eines Auges berichtet:

Gibt man einem Auge eine konstante Leuchtdichte, verringert die Leuchtdichte für das andere Auge von diesem Wert an stufenweise und führt diesen Versuch für beide Augen in gleicher Weise durch, so ist bei einem Kollektiv von 40 Versuchspersonen die binoculare Helligkeitsempfindung größer, wenn das in der Richtungslokalisation führende Auge die konstante also größere Leuchtdichte erhält.

Der Verlauf der Kurve der binocularen Helligkeitsempfindung als Funktion der abnehmenden monocularen Leuchtdichte bei konstanter Leuchtdichte des anderen Auges wird diskutiert. Für Unterschiede der beiden monocularen Leuchtdichten von weniger als 0,6 log. Einheiten ist die binoculare Helligkeitsempfindung eine lineare Funktion der monocularen Leuchtdichten. Dominanzeinfluß bestimmt die Steigung dieser Geraden. Für größere Leuchtdichteunterschiede verlaufen die Kurven nicht mehr linear, sie werden von Wettstreiterscheinungen entscheidend bestimmt.

Angesichts der großen individuellen Unterschiede hinsichtlich der Ausprägung des Dominanzeinflusses auf die binoculare Helligkeitswahrnehmung wird eine generelle Übereinstimmung der Dominanz in der Richtungslokalisation mit rein sensorischer Dominanz abgelehnt. Die Vorherrschaft eines Auges beim binocularen Sehakt wird für die verschiedenen Funktionen als verschieden ausgeprägt und verteilt angenommen.

Die Trennung der Eindrücke beider Augen wurde mit dem Verfahren der PHASENDIFFERENZHAPLOSKOPIE von AULHORN vorgenommen. Diese Methode gestattet es, ein Feld, das nur vom rechten und ein gleiches, das nur vom linken Auge gesehen werden kann, auf die gleiche Stelle und unmittelbar angrenzend an dieses Testfeld gleichzeitig ein binocular gesehenes Vergleichsfeld zu projizieren, was eine sehr genaue Einstellung des Vergleichsfeldes auf gleiche Helligkeit mit dem Testfeld ermöglicht.

LITERATUR

AUBERT, H.
Physiologie der Netzhaut, Breslau 1865

AULHORN, E.
Phasendifferenzhaploskopie. Eine neue Methode zur Trennung der Eindrücke beider Augen.
Klin. Mbl.f. Augenhk., **148**, 540–544 (1966)

Die gegenseitige Beeinflussung abbildungsgleicher Netzhautstellen bei normalem und gestörtem Binocularsehen.
Doc. Ophthal. **23**, 26–61 (1967)

AULHORN, E., HARMS, H. & RAABE, M.
Die Lichtsunterschiedsempfindlichkeit als Funktion der Umfeldleuchtdichte.
Doc. Ophthal. **20**, 537–556 (1966)

BOUMAN, M.A.
On foveal and peripheral interaction in binocular vision.
Opt. Act. **1**, 177–183 (1955)

CRAWFORD, B. H.
Ocular interaction in its relation to measurements of brightness thesholds.
Proc. Roy. Soc. B., **128**, 552–559 (1940)

DAWSON, S.
Binocular and uniocular discrimination of brightness.
Brit. J. Psychol. **6**, 78–108 (1913)

DE SILVA, H.R. & BARTLEY, S. H.
Summation and subtraction of brightness in binocular perception.
Brit. J. Psychol. **20**, 241–250 (1930)

ENGEL, G. R.
The visual processes underlying binocular brightness summation.
Vision Res. **7**, 753–767 (1967)

ERNITZ, T.
Binocular Brightness Summation. Unpublished Masters Thesis, University of Western Ontario.
(zitiert nach G. R. Engel.)

FECHNER, G. Th.
Über einige Verhältnisse des binocularen Sehens.
Abh. Kön. Sächs. Gesells. Wis. **5**, 336–564 (1861)

FRY, G. A. & BARTLEY, S. H.
The brilliance of an object seen binocularly.
Amer. J. Ophthal. **16**, 687–693 (1933)

GALIFRET, Y. & PIERON, H.
Contribution à l'étude du problème de l'interaction des stimulations périphériques binoculaires.
Comptes Rendus Séances Soc. Biol. **148**, 215–219 (1954)

GELLHORN, E. & KUCKENBURG, F.
Quantitative Untersuchungen über den Wettstreit der Sehfelder.
1. Mitteilung: Der Einfluß der Helligkeit der Farben auf den Wettstreit mit besonderer Berücksichtigung der Kontrastwirkungen.
Pflügers Archiv d. ges. Physiol. **206**, 194–210 (1924)

GELLHORN, E. & SCHÖPPE, Ch.
Quantitative Untersuchungen über den Wettstreit der Sehfelder.
2. Mitteilung: Die Änderung des Wettstreits durch Umstimmung des Sehorgans.
Pflügers Archiv d. ges. Physiol. **206**, 211–236 (1924)

GELLHORN, E.
Quantitative Untersuchungen über den Wettstreit der Sehfelder.
3. Mitteilung: Zur Kenntnis der psychologischen Ursachen des Wettstreits.
Pflügers Archiv d. ges. Physiol. **206**, 237–249 (1924)

GELLHORN, E. & SCHÖPPE, Ch.
Quantitative Untersuchungen über den Wettstreit der Sehfelder.
4. Mitteilung: Über den Einfluß von farbigen Nebenreizen auf den Wettstreit.
Pflügers Archiv d. ges. Physiol. **208**, 393–407 (1925)

GELLHORN, E. & SCHÖPPE, Ch.
Quantitative Untersuchungen über den Wettstreit der Sehfelder.
5. Mitteilung: Über den Einfluß der Beleuchtungsstärke sowie der Adaptation auf die Größe des Wettstreitquotienten.
Pflügers Archiv d. ges. Physiol. **208**, 408–417 (1925)

GELLHORN, E.
Über den Wettstreit im Nachbild.
Pflügers Archiv d. ges. Physiol. **218**, 54–82 (1928)

GRAHAM, C. H.
An Investigation of binocular summation:
I. The fovea.
J. gen. Psychol. **3**, 494–510 (1930)
An Investigation of binocular summation:
II. The periphery.
J. gen. Psychol. **5**, 311–327 (1931)

GRÜSSER, O.-J.
Anatomische und physiologische Grundlagen des Binocularsehens.
Habil.-Schrift. Berlin 1963

GRÜSSER, O.-J. & GRÜSSER-CORNEHLS, U.
Neurophysiologische Grundlagen des Binocularsehens.
Arch. f. Psychiatrie u. Ztschr. f. d. ges. Neurologie **207**, 296–317 (1965)

GRÜSSER, O.-J., HELLNER, K.A. & GRÜSSER-CORNEHLS, U.
Die Informationsübertragung im afferenten visuellen System.
Kybernetik **1**, 175–192 (1962)

HAMBURGER, F. A.
Über monoculare Dominanz im binocularen Sehakt.
Klin. Mbl. f. Augenhk. **109**, 1–11 (1943)
Der Wettstreit und seine Rolle im Binocularsehen.
Klin. Mbl. f. Augenhk. **115**, 289–319 (1949)

HELMHOLTZ, H. VON
Handbuch der physiologischen Optik § 32
Wettstreit der Sehfelder 766–796.
Leipzig, Leop. Voss 1867

HERING, E.
Beiträge zur Physiologie.
V. Vom binocularen Tiefensehen.
Kritik einer Abhandlung von Helmholtz über den Horopter.
Leipzig 1864.
Grundzug der Lehre vom Lichtsinn.
2. Edition, Berlin 1920

HILLEMANNS, M.
Die funktionelle Asymmetrie der Augen, die Vorherrschaft eines derselben und die binoculare Richtungslokalisation.
Klin. Mbl. f. Augenhk. **78**, 737–761 (1927) und **79**, 17–42 (1927)
Das Problem der Äugigkeit (I)
Erklärung des Rechtsdralls (II)
Klin. Mbl. f. Augenhk. **117**, 69–80 (1950)

HUBEL, D. H. & WIESEL, T. N.
Receptive fields of single neurones in the cat's striate cortex.
J. Physiol. **148**, 574–591 (1959)
Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex.
J. Physiol. **160**, 106–154 (1962)

IVANOFF, A.
Au sujet de l'expérience paradoxale de Fechner.
Acad. Sci. Opt. Physiol. **224**, 1443–1455 (1947)

JAMIESON, D. & HURVICH, L. M.
The complexities of perceived brightness.
Science, N.Y. **133**, 174–179 (1961)

JUNG, R.
Korrelationen von Neuronentätigkeit und Sehen.
Aus: Jung, R. & Kornhuber, H.: Neurophysiologie und Psychophysik des

visuellen Systems, 411–434. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1961

JUNG, R., CREUTZFELDT, O. & GRÜSSER, O.-J.
Die Mikrophysiologie kortikaler Neurone und ihre Bedeutung für die Sinnes- und Hirnfunktionen.
Dtsch. med. Wschr. 82, 1050–1059 (1957)

KAUFMAN, L.
On the spread of suppression and binocular rivalry.
Vision Res. 3, 401–415 (1963)

KÜCHLE, H. J. & REMKY, H.
Über monoculare Dominanz („Äugigkeit"); alte und neue (haploskopische) Methoden zu ihrem Nachweis und deren Wert für ihre Beurteilung.
v. Graef. Archiv f. Ophth. 152, 62–88 (1951)

LEVELT, W. J. M.
Binocular brightness averaging and contour information.
Brit. J. Psychol. 56, 1–13 (1965)
On binocular rivalry, Monograph Institute for Perception RVO - TNO Soesterberg, The Netherlands (1965)

LITINSKIJ, G.
Messung des Prävalierungsgrades des führenden Auges im binocularen Sehakte.
Russ. Oftalm. Z. 14, 96–100 (1931)
(Dt. Zsf.: Zbl. f. Augenhk. 27, 60 (1932)

LOHMANN, W.
Über die „binoculare Reizsummierung" bei Untersuchung der Lichtschwellen.
Archiv f. Augenhk. 79, 110–116 (1915)

MILES, W. R.
Ocular dominance in human adults.
J. Gen. Psychol. 3, 412–430 (1930)

PANUM, P.
Physiologische Untersuchungen über das Sehen mit zwei Augen.
Kiel 1858

PIPER, H.
Über das Helligkeitsverhältnis monocular und binocular ausgelöster Lichtempfindungen.
Z. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane 32, 161–176 (1903)

PIRENNE, M. H.
Binocular and unicular thresholds of vision.
Nature, London 152, 698–699 (1943)

REMKY, H.
Die gegenseitige Induktion der Doppelnetzhaut als Grundlage des beidäugigen Sehaktes.
v. Graef. Archiv f. Ophthal. 150, 120–134 (1950)

ROELOFS, C. O.
Über den Wettstreit und Schwankungen im Sehfeld.
v. Graef. Archiv f. Ophthal. **104**, 133–148 (1921)

ROELOFS, C. O. & ZEEMANN, W. P. C.
Zur Frage der binocularen Helligkeit und der binocularen Schwellenwerte.
v. Graef. Archiv f. Ophthal. **88**, 1–27 (1914)

Beiträge zur binocularen Helligkeitsempfindung.
v. Graef. Archiv f. Ophthal. **92**, 527–550 (1917)

Über den Wettstreit der Konturen.
v. Graef. Archiv f. Ophthal. **99**, 79–104 (1919)

ROSENBACH, O.
Über monoculare Vorherrschaft bei binocularem Sehen.
Münch. Med. Wsch. **50**, 2, 1290–1292 (1903)

SACHSENWEGER, R.
Sensorische Fusion und Schielen.
v. Graef. Archiv f. Ophthal. **159**, 502–524 (1958)

Studien über den stereoskopischen Glanz.
v. Graef. Archiv f. Ophthal. **162**, 518–526 (1960)

SCHOBER, H.
Das Sehen, Bd. II, Kap. XIV,
Das beidäugige Sehen, 361–390
Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1964

SCHRÖDINGER, E.
Die Gesichtsempfindungen, 456
In: Müller-Pouilets Lehrbuch der Physik,
11. Edit. 2 (1) 1926

SHERRINGTON, C. S.
The integrative action of the nervous system.
London: Constable 1908

STEVENS, S. L.
Adaptation level vs. the relativity of judgment.
Amer. J. Psychol. **71**, 633–646 (1958)

TOMLINSON, J. H.
A note on the comparative brilliance values of the single and the two eyes.
Trans. Brit. Ophthal. Soc. **44**, 354 f (1924)

Comparative brightness values of the two eyes and the single eye.
Trans. Brit. Ophthal. Soc. **45**, 547–554 (1925)

A further note on the comparative brightness values of the single eye and the two eyes.
Trans. Brit. Ophthal. Soc. **46**, 203–206 (1926)

TREISMAN, A.
Binocular rivalry and stereoscopic depth perception.
Quart. J. Exp. Psychol. **14**, 23–37 (1962)

TSCHERMAK-SEYSENEGG, A.
Wechselwirkung beider Sehfelder,
aus Bethe, Bergemann, Emden, Ellinger:
Handbuch der normalen und pathologischen Physiologie,
12. Bd.: optischer Raumsinn, 4., 916–928, Berlin: Springer 1931
Art des Zusammenwirkens der beiden Netzhäute,
aus: Einführung in die physiologische Optik,
4., 92–95, Berlin: Springer 1942

Für die Überlassung des Themas, für freundliche Unterstützung und wertvolle Anregungen danke ich Frau Professor Dr. E. Aulhorn.

Lebenslauf

Am 26. September 1943 wurde ich, Stephan Eisert, in Waiblingen als Sohn des Dr.med. Herbert Eisert und seiner Ehefrau Carola, geb. Salzmann geboren. Nach Besuch der Volks- und Oberschule in Waiblingen wechselte ich im Dezember 1953 auf das Gymnasium in Geislingen (Steige) über und legte dort im März 1962 die Reifeprüfung ab.

Vom Sommersemester 1962 bis zur ärztlichen Vorprüfung am 5. April 1965 studierte ich in Tübingen. Dort absolvierte ich auch, bis auf das Wintersemester 1965/66 in Innsbruck, mein weiteres Studium und bestand am 12. August 1968 das Medizinische Staatsexamen.